قسمت دوم و پایانی

شناوری، وزن مخصوص و ترازوی حکمت خازنی

غلامحسین رحیمی
استادبخش مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

اشاره
در قسمت اول این مقاله با شرح حال خازنی فیزیک‌دان و منجم برجستهٔ اسلامی و شاهکار وی، کتاب میزان‌الحکمه آشنا شدید. در این بخش ترازوی حکمت خازنی و ویژگی ممتاز آن معرفی می‌شود و یکی از کاربردهای آن مورد تحلیل علمی قرار می‌گیرد.

۴. ترازوهای آبی در آینهٔ میزان‌الحکمهٔ خازنی

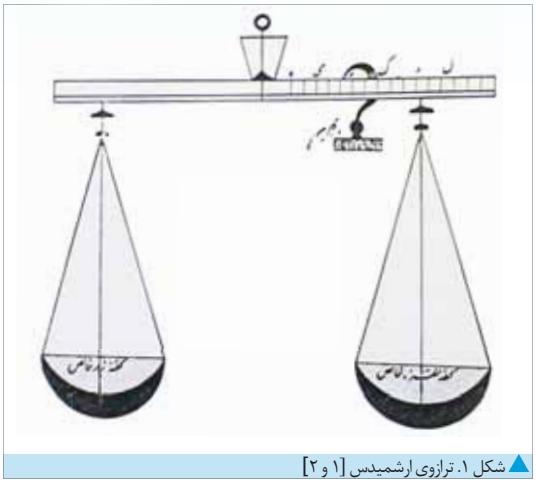
همان‌گونه که گفته شد یکی از مآخذ مهمی که در زمینهٔ ترازوها و مخترعان آن‌ها وجود دارد، کتاب «میزان‌الحکمه» تألیف ابوالفتح عبدالرحمن خازنی است. وی در این کتاب به شرح آثار دانشمندانی که در این زمینه کار کرده‌اند پرداخته، و به سبک خود، آن‌ها را توصیف کرده است. دانشمندانی که خازنی نامشان را در کتاب خود آورده عبارت‌اند از: ارشمیدس یونانی، ثابت‌بن قرّه، ابوریحان بیرونی، محمدزکریای رازی، عمر خیّام (خیامی) و ابوحاتم اسفزاری.

آنچه در ادامه می‌آید نخست توصیف هر ترازو مطابق با متن کتاب و سپس تحلیل علمی ترازوست.

۴-۱. ترازوی ارشمیدس

اولین ترازویی که خازنی معرفی می‌کند، ترازوی منسوب به ارشمیدس است که فقط در میزان‌الحکمه توصیف شده است و رسالهٔ مستقلی از آن در دسترس نیست.

توصیف ترازو: ترازوی ارشمیدس مطابق با نقل خازنی متشکل از یک میلهٔ تیرمانند افقی است که نیمی از آن به سی بخش تقسیم شده است (شکل ۱ را ببینید). یک حلقهٔ کشویی (منقّله) که از آن وزنه (ناره) آویخته می‌شود، نیز ساخته شده و در طرف مدرّج نصب می‌گردد.



شکل ۱. ترازوی ارشمیدس [۱ و ۲]

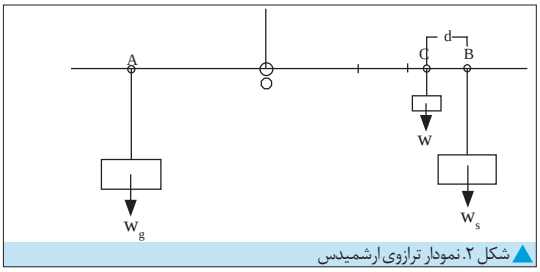
اکنون مقدار معینی طلای خالص و به همان وزن نقره انتخاب می‌کنیم. زر در کفهٔ **ز** (کفهٔ زر) که به نیمهٔ غیرمدرج میله آویزان و ثابت است، و نقره در کفهٔ **ن** قرار می‌گیرد. میلهٔ افقی کاملاً موازی زمین است. اکنون، هر کفه را در آب فرومی‌بریم. میلهٔ ترازو (کفهٔ زر) به طرف پایین می‌رود. اکنون وزنهٔ متحرک را که به قسمت مدرج میله آویخته شده، چندان روی میله جابه‌جا می‌کنیم تا بار دیگر میله به حالت کاملاً افقی قرار گیرد. بنابراین، فاصلهٔ بین وزنه و کفهٔ نقره مشخص می‌شود.

اکنون، اگر بخواهیم ترکیب آلیاژی از طلا و نقره را مشخص کنیم، آن آلیاژ را با نقرهٔ خالص به‌صورت برابر وزنی می‌کشیم به‌گونه‌ای که وزن هر دو در هوا یکسان باشد. نقرهٔ خالص را در کفهٔ نقره و آلیاژ را در کفهٔ طلا می‌نهیم. سپس، آن‌ها را به شیوهٔ بالا، در میان آب می‌گذاریم و وزن می‌کنیم و میل ترازو را، به کمک جابه‌جایی وزنه، کاملاً افقی می‌کنیم. محل وزنهٔ متحرک معین می‌شود. اگر کمتر از آن بود که قبلاً برای طلا نشانه‌گذاری شده است، بدون شک آلیاژ مخلوطی از زر و نقره، است. مقدار طلا در آلیاژ به نسبت عدد مشخص شده توسط وزنه (فاصلهٔ وزنه تا کفه) با آن عددی است که در ابتدا برای طلای خالص نشان شده، است.

تحلیل ترازوی ارشمیدس: شکل ۲ را که طرحی از ترازوی ارشمیدس است در نظر بگیرید. در ابتدا دو قطعه طلا و نقرهٔ هم‌وزن انتخاب می‌شود. بنابراین، $W_g=W_s$. در ضمن

$$W_s=\rho_s g V_s=\gamma_s V_s \quad \text{وزن نقره} \qquad (۱۱)$$
$$W_g=\rho_g g V_g=\gamma_g V_g \quad \text{وزن طلا}$$

چون وزن دو فلز مساوی انتخاب شده است، لذا: $\gamma_g V_g=\gamma_s V_s$. اما $\gamma_g>\gamma_s$، در نتیجه $V_s>V_g$ یعنی حجم قطعهٔ نقره بیشتر از حجم طلا است.



شکل ۲. نمودار ترازوی ارشمیدس

علاوه بر این، در ابتدا که وزنهٔ کشـویی به میل ترازو آویخته نیسـت، ترازو در تعادل اسـت. با توجه به اینکه گشتاور حوله نقطهٔ o باید صفر باشد، داریم:

$$W_g.AO = W_s.OB \quad \Rightarrow AO = OB = l$$

یعنـی دو پله به فاصلهٔ مسـاوی از محل تکیه‌گاه میل ترازو قرار گرفته‌اند. البته، مشـروط بر آنکـه وزن دو کفه نیز با هم برابر باشد.

اکنون، هر دو کفه در آب قرار می‌گیرند. اگر حجم هر کفه V_c باشد، وزن هر کفه عبارت است از:

(۱۲) وزن کفـهٔ نقـره - $W_s + \gamma_w(V_c - V_s) = W_s + \gamma_w V_c - \gamma_w V_s$

(۱۳) وزن کفـهٔ طـلا - $W_g + \gamma_w(V_c - V_g) = W_g + \gamma_w V_c - \gamma_w V_g$

در دو عبارت فـوق دو مقدار $\gamma_w V_s$، یعنی وزن آبِ هم‌حجم نقره، و $\gamma_w V_g$، یعنی وزن آبِ هم‌حجم طلا، نابرابرند و داریم:

$$\gamma_w V_s > \gamma_w V_g \qquad (۱۴)$$

بنابراین، وزن کفهٔ طلا بیشـتر بوده و میل ترازو به‌سمت آن متمایل می‌شود. برای برقراری تعادل افقی ترازو، وزنهٔ W روی میلهٔ طرف کفهٔ نقره قرار می‌گیرد و آن‌قدر جابه‌جا می‌شود تا در نقطهٔ C تعادل برقرار شود. تعادل گشتاورها می‌دهد:

$$W'_g.l = W'_s.l + W(l-d) \Rightarrow Wd = (\gamma_w V_g - \gamma_w V_s + w)l \qquad (۱۵)$$

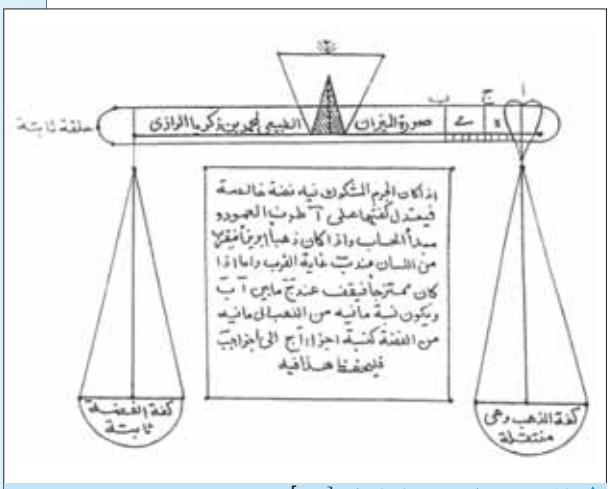
بـا توجه به معلـوم بودن تمام کمیت‌ها فاصلـهٔ d به‌راحتی به‌دسـت می‌آید و اینکه این فاصله حاوی چند درجه اسـت مشـخص می‌گردد. در روابط بالا فرض شد که دو کفه از یک جنس و از هر نظر مشابه‌اند.

اکنـون مادهٔ مرکـب A را با وزن W_a، که برابـر با وزن نقرهٔ خالص اسـت، انتخـاب می‌کنیم. نقره را در کفـهٔ نقره و مادهٔ مرکب را در کفهٔ طلا می‌گذاریم و کفه‌ها را پر از آب می‌کنیم. اگـر برای تعادل، وزنه در همـان فاصلهٔ d باید قرار می‌گرفت، ماده قطعاً طلا اسـت. اگـر در فاصلهٔ بیـن B و C قرار گیرد، ترکیبی از طلا و نقره است. نسبت این دو فلز به نسبت درجات میان B و C در دو حالت است.

۴-۲. ترازوی محمدزکریای رازی یا ترازوی طبیعی

روش زکریای رازی در ترازوی خود، برخلاف روش ارشمیدس است. چرا که رازی هر دو پلهٔ ترازو را با جرمی پر از آب که در آن اسـت، در هوا وزن می‌کند. در این وضعیت آب موجود در کفهٔ به اندازهٔ حجم جرم واقع در کفه کمتر است.

توصیـف تـرازو: خازنی بـه نقـل از رازی می‌گوید که در سـاختن این ترازو باید نهایت دقت بشـود. نخست دو کفه از یک جنس و طوری سـاخته می‌شود که گنجایش آب هر دو کفه دقیقاً یکسان باشـد. هر دو کفه باید به‌گونه‌ای با سوهان سـاییده شوند تا وزن هر دو یکسـان گردد. اکنون میلهٔ افقی (عمود)، میل ترازو، به شـکل عمود قپان، در نهایت راستی و همواری سـاخته می‌شـود. کفهٔ اول در یک طرف میل ترازو آویخته و محکم می‌شـود. در انتهـای کفهٔ دیگر حلقه‌ای قرار دارد کـه بـه روی نیمهٔ دیگر میل ترازو می‌لغزد (شـکل ۳ را ببینید). کفهٔ مذکور از این حلقه آویخته می‌شـود. میل ترازو کفهٔ متغیر چندان جابه‌جا می‌شـود تـا در حالت افقی و ترازو کامـلاً در تعادل و موازنه قرار گیـرد. آن محل موضع اولیه و اصلی حلقه خواهد بود.

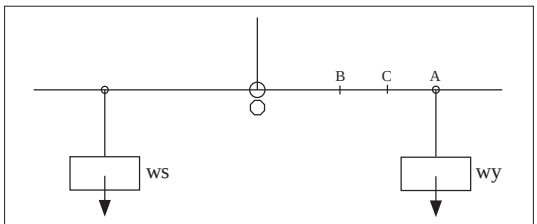


▲ شکل ۳. تصویر ترازوی محمدزکریای رازی [۱ و ۲]

اکنون یک مثقال زر در کفهٔ متحرک قرار می‌دهیم و مثقالی نقره در کفهٔ ثابت. واضح است که تعادل استاتیکی ترازو به‌هم نمی‌خورد. سپس، هر دو کفه را، با طلا و نقره، در میان آب فرو می‌بریم تا پر از آب شـوند. آن‌ها را از آب بیرون بکشیم. میل ترازو به‌سمت کفهٔ طلا متمایل می‌شود چرا که جرم زر از نظر حجم کمتر از جرم نقره اسـت و آب در آن کفه که طلا است بیشـتر از کفهٔ دیگر است. پس حلقه را جابه‌جا می‌کنیم و به زبانه (علاقه) نزدیک‌تر می‌کنیم تا میل ترازو کاملاً افقی گردد. در محل استقرار حلقه نشان **ب** می‌نویسیم و **ا** را در محل اولیهٔ حلقه نوشته و حرف **ج** را میانه **ا** و **ب** درج می‌کنیم (شکل ۳).

اکنـون، اگر در تشـخیص ماده‌ای، بین طـلا و نقرهٔ خالص، شـبهه‌ای پدید آید، نقرهٔ خالص بـه وزن جرم مورد نظر را در کفهٔ ثابت می‌گذاریم و فلز همبستهٔ مورد نظر را در کفهٔ لغزنده می‌نهیـم و حلقـه را در نقطهٔ **ا** قرار می‌دهیـم. اگر میل ترازو راست و افقی ماند، آلیاژ نقرهٔ خالص است و اگر بر نقطهٔ **ب** ماند طلای خالص است و اگر بر نقطه‌ای مانند **ج** منطبق شد نیمی طلا و نیمی نقره اسـت، و اگر موضعی که حلقه قرار می‌گیرد بین **ا** و **ج** بود نقره بیشتر است، و اگر موضع مذکور میان **ج** و **ب** باشد طلا بیشتر است.

تحلیل ترازوی زکریـای رازی: در ترازوی زکریای رازی، حجم، جنس و وزنِ هر دو کفه دقیقاً یکی اسـت. کفهٔ نقره به میل افقی ترازو ثابت می‌شود (به فاصله DO = l) اما کفهٔ طلا روی بازوی سمت راسـت میله می‌تواند بلغزد. بنابراین، ترازو در حالـت اولیه، که کفه‌ها به آن نصب شـده و OD = OA، در حالت تعادل اسـتاتیکی قرار دارد. اگر دو قطعه طلا و نقرهٔ هم‌وزن (هر کدام مثلاً یـک مثقال) در دو کفه قرار گیرند در این‌حالت نیز تعادل اسـتاتیکی کماکان برقرار است. شکل ٤ نمودار ترسیم شدهٔ ترازو را برای تحلیل نشان می‌دهد.



شکل ٤. نمودار ترازوی رازی برای تحلیل

اکنـون هر دو کفه را پر از آب می‌کنیم. ترازو به‌سـمت کفهٔ طلا مایل می‌شود. تحلیل موضوع در ترازوی ارشمیدس صورت گرفـت. اکنون حلقهٔ متصل به کفهٔ طلا را جابه‌جا می‌کنیم تا میل ترازو کاملاً افقی و مجدداً تعادل اسـتاتیکی برقرار است. محل جدید حلقه را با علامت B مشخص می‌کنیم. علامت C را در وسط A و B می‌گذاریم. فرض شود: AB = d.

همان‌گونه که گفته شـد یکی از تفاوت‌های ترازوی رازی با ارشـمیدس آن اسـت که در ترازوهای رازی کفه‌های آبی در خلال وزن کردن از آب بیرون کشیده می‌شود. یعنی کفه‌های پرآب و حاوی فلزات در هوا وزن می‌شوند.

در وضعیت اولیه، گشتاور حول نقطهٔ O به تعادل می‌رسد:

$$W_{cg}.l = W_{cs}.l \qquad (16)$$

زمانـی که طلا و نقرهٔ هـم‌وزن را روی دو کفه می‌گذاریم و هـر دو کفه را نیز پر آب می‌کنیم، تعادل اسـتاتیکی نیازمند آن است که:

$$W_{ps}.l = W_{pg}(l-d) \qquad (17)$$

$$W_{ps} = W_{pg}(1-\frac{d}{l})$$

که OB = l- d فاصلهٔ کفهٔ طلا از نقطهٔ O اسـت و W_{ps} وزن کفهٔ نقرهٔ پر شده از آب است.

اکنـون آلیاژی از طـلا و نقره را در نظر بگیرید که نسـبت ترکیب آن مشخص نیسـت. در کفهٔ نقره، تکه‌ای نقره با وزن برابر مادهٔ مورد نظر گذاشته می‌شود و مادهٔ x در کفهٔ طلا قرار می‌گیرد. مجدداً کفه‌های حاوی اجرام پر از آب می‌شوند. فرض کنیـد که تعادل ترازو در فاصلهٔ l_x از نقطهٔ O برقرار می‌شـود. بنابراین، داریم:

$$W_{ps}.l = W_{px}.l_x \Rightarrow W_{ps} = W_{px}.\frac{l_x}{l} \qquad (18)$$

نسبت l/lx را می‌توان برای تعیین نسبت طلا و نقره در مادهٔ مرکب بـه‌کار گرفت. فاصلهٔ بین A و B به دقت مدرّج شـده است.

به روابط زیر توجه شود:

(۱۹) وزن کفهٔ نقره

$$W_{ps} = W_{ws} + W'_s = \gamma_w V_{ws} + (\gamma_s V_s \gamma - \gamma_w V_s)$$

(۲۰) وزن کفهٔ حاوی جرم x

$$W_{px} = W_{wx} + W'_x = \gamma_w V_{wx} + (\gamma_x V_x - \gamma_w V_x)$$

که $V_{ws} + V_s = V_{wx} + V_x = V$ حجم هر کفه است.

از ترکیبات معادلات (۱۷) و (۱۸) داریم:

$$W_{px}\frac{l_x}{l} = W_{pg}(1-\frac{d}{l}) \Rightarrow W_{px} = W_{pg}\frac{l-d}{l_x} \qquad (21)$$

اکنون اگر

$l_x = l \Rightarrow W_{px} = W_{pg}(1-\frac{d}{l}) \Rightarrow W_x = W_s$

جسم نقرهٔ خالص است؛

و اگر

$l_x = l-d \Rightarrow W_{px} = W_{pg} \Rightarrow W_x = W_g$

جسم طلای خالص است؛

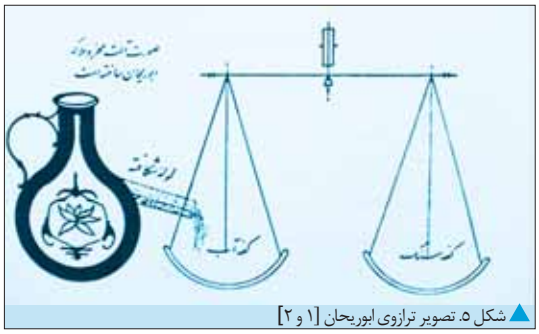
و اگر

$l = l'\ (l-d < l' < l)$

جسم مرکب از طلا و نقره است.

۴-۳. ترازوی ابوریحان

خازنـی به نقل از ابوریحان می‌گوید: دسـتگاهی سـاخته‌ام مخروطی‌شـکل کـه بخش پایینی آن پهن و سـر آن تنگ با گردنی کشـیده است. این وسیله که به‌شکل تنگ است کاملاً صاف و هموار اسـت و **آلت مخروطـی** (تنگ مخروطی) نام دارد. در بخـش بالای تنگ سـوراخی تعبیه شـده که به آن لوله‌ای خمیده متصل شده است به‌گونه‌ای که شکل ناودان به خود گرفته است.[٤٠] (شکل ٥)


شکل ٥. تصویر ترازوی ابوریحان [۱ و ۲]

در ترازوی زکریای رازی، حجم، جنس و وزنِ هر دو کفه دقیقاً یکی است. کفهٔ نقره به میل افقی ترازو ثابت می‌شود اما کفهٔ طلا روی بازوی سمت راست میله می‌تواند بلغزد

اکنـون چون تنگ را تا لبهٔ سـوراخ پـر از آب کنند و مقدار معلومـی از فلز یا جواهر به میان آب انداخته شـود، به اندازهٔ حجم جسـم آب بـالا می‌آیـد و از لولهٔ ناودانی‌شـکل خارج می‌گردد. سر لوله روی کفهٔ آب ترازوی دوپله‌ای قرار دارد. لذا، مقدار آب مذکور به کفه ریخته و با ترازو و وزنه‌های معین، وزن آب مشخص می‌شود.

چون وزن آب هم‌حجم فلز معین شـد، مقـدار حجم آن‌ها نیز مشخص می‌شود. بنابراین، با تنظیم جداولی می‌توان وزن فلزات را، در ترکیب فلزات مرکب و نظایر آن، یافت.

تحلیل ترازوی ابوریحـان: فلزی را در نظر می‌گیریم که حجم آن V باشـد. چنانچه وزن آن در هوا به W باشـد وزن مخصوص آن برابر است با:

$$\gamma = \frac{W}{V} \qquad (۲۲)$$

توجه شود که در رابطهٔ بالا حجم جسم معلوم نیست.

البته، می‌توان وزن جسم را با ترازوی مذکور اندازه‌گیری کرد. وزن آب هم‌حجم (W_w) آن را نیز به شیوهٔ فوق می‌توان اندازه گرفت. بنابراین، وزن مخصوص جسـم از رابطهٔ زیر به‌دسـت می‌آید:

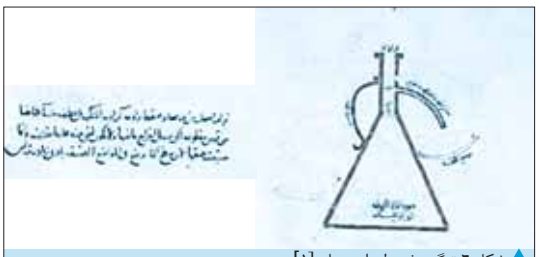
$$\gamma = \frac{W}{W - W'} \qquad (۲۳)$$

W' وزن جسم در آب (وزن ظاهری) می‌باشد که برابر است با:

$$W' = W - W_w \qquad (۲۴)$$

که W_w وزن آب هم‌حجم جسم است، که با ترازو اندازه‌گیری شده است. توجه شود که با داشتن وزن و وزن مخصوص جسم، از رابطهٔ (۲۲)، می‌توان حجم آن را محاسبه کرد.

شـکل ٦ تنگ مخروطی ابوریحان را از نسـخهٔ اصلی نشـان می‌دهد.



▲ شکل ٦. تنگ مخروطی ابوریحان [۱]

بنابراین، با ترازوی ابوریحان می‌توان وزن مخصوص اجسـام مختلف را اندازه گرفت. احتمالاً تنگ مخروطی ابوریحان را باید یکی از قدیمی‌ترین چگالی‌سنج‌های جهان دانست.[۴۱] لازم به ذکر است که بنوموسی نیز در کتاب «الحیل» دستگاهی دارد که می‌تواند به نوعی چگالی‌سنج تلقی گردد. ترازوی ابوریحان به‌رغـم سـادگی آن، به‌دلیل دقت اجزا و دسـتگاه و نیز دقت اندازه‌گیری‌ها، دقیق‌ترین وزن مخصوص‌ها را به‌دست می‌دهد.

این ترازو که بر پایهٔ اصل شـناوری کار می‌کند، در رساله‌ای از ابوریحان به‌نام «مقاله فی‌النِّسَبِ الّتی بَین الفلزات و الجواهِر فی الحجم» توضیح داده شده است.[۴۲]

در خصوص نحوهٔ اندازه‌گیری وزن مخصوص توسط ابوریحان بیرونی و عبدالرحمن خازنی و جداول استخراج شده و مقایسهٔ آن بـا مقادیر معادل امروزی آن، در مقالهٔ دیگری بحث شـده است.

در هر حال، برای تکمیل بحث و اسـتفادهٔ خوانندگان، یکی از جداول مرتبط با موضوع این مقاله مورد بررسـی و محاسبه قرار می‌گیرد. جدول ۲ یکی از جداول مقادیر اندازه‌گیری شدهٔ بیرونی است که در کتاب خازنی آمده است.[۴۳] نیمی از جدول ۲، عیناً از کتاب خازنی برداشته شده و نیم دیگر محاسبات و معادل‌های امروزی آن است که به آن افزوده شده است. بیرونی از ۹ فلـز انتخابـی خود، هر یک قطعه‌ای بـه وزن صد مثقال انتخاب کرده اسـت و با استفاده از وسیلهٔ مخروطی اختراعی خود، وزن آب جابه‌جا شـده ناشی از قرار گرفتن قطعهٔ فلزی در آب را به‌دقت اندازه‌گیری کرده که در جدول آمده است.

برای محاسـبهٔ وزن مخصوص، نیازی به تبدیل یکاهای وزن قدیـم به جدید نیسـت. چرا که وزن مخصوص از نسـبت دو کمیـت هم‌بعد حاصل می‌شـود و لذا خود بدون بعد اسـت. وزن آب هم‌حجم قطعهٔ فلزی صد مثقالی که توسـط بیرونی اندازه‌گیری شده است، از رابطهٔ جبری زیر به‌دست می‌آید:

(۲٤) برحسب جو

$$W_w = ٦٨/٥٧ \times \text{مثقال} + ٨ \times \text{دانگ} + ٤ \times \text{تسو}$$

لذا، وزن مخصوص هر فلز را به سادگی از رابطهٔ زیر محاسبه می‌کنیم:

$$\gamma = \frac{١٠٠ \times ٦٨/٥٧}{W_w} \qquad (۲۵)$$

مقدار W_w و γ مندرج در جدول ۲ از دو رابطهٔ بالا به‌دسـت آمده است.

درخصوص جدول (۲) در ارتباط با خطاسـنجی و یا افزایش دقت، توضیح باید داد که برنج آلیاژی اسـت از مس و روی به رنـگ زرد که حدود ٦۰ درصد آن مس اسـت. علاوه بر این، خازنی به نقل از بیرونی می‌گوید که سپیدرو، یک آلیاژ فلزی، متشـکل از مس و رصاص، اسـت و رنـگ آن، برخلاف روی، سرخ است.

همان‌گونه که در جدول ۲ مشـاهده می‌شـود تفاوت اعداد بیرونـی (خازنی) با مقادیر امروز بسـیار اندک و تماماً محدود به دهم و صدم اعشـار می‌شود که این هم فقط ناشی از دقت دستگاه‌ها و دقت آزمایش‌کننده‌های امروزی است. از همین‌جا می‌توان بـه میزان دقت، صحت عمل و روش علمی ابوریحان پی برد.

ابوریحـان علاوه بر تکرار آزمایش، از روش معکوس نیز برای سـنجش دقت روش خود و مقادیر به‌دسـت آمده اسـتفاده

جدول ۲. مقایسهٔ وزن‌های مخصوص بیرونی و امروزی

نام فلز (کتاب)	نام فلز (امروزی)	وزن آب اندازه‌گیری شده			وزن آب برحسب جو W_w	وزن مخصوص (بیرونی) γ	وزن مخصوص (امروزی)
		مثقال	دانگ	تسو			
زر	طلا	۵	۱	۲	۳۵۸/۸۵	۱۹/۱۰۸	۱۹/۲۶
زیبق	جیوه	۷	۲	۱	۵۰۰	۱۳/۷۱۴	۱۳/۵۹
سرب	سرب	۸	۵	۰	۵۸۸/۵۶	۱۱/۶۵	۱۱/۳۴۴
نقره	نقره	۹	۴	۱	۶۵۳/۱۳	۱۰/۴۹۸	۱۰/۵۰
سپیدرو		۱۱	۲	۰	۷۷۰/۲۷	۸/۹۰۲	
مس	مس	۱۱	۳	۰	۷۷۸/۲۷	۸/۸۱	۸/۹۲
برنج*	برنج	۱۱	۴	۰	۷۸۶/۲۷	۸/۷۲۰۹	۸/۴
آهن	آهن	۱۲	۵	۲	۸۷۰/۸۴	۷/۸۷۴	۷/۸
رَصاص	قلع	۱۳	۴	۰	۹۲۳/۴۱	۷/۴۲۵	

می‌کند. بدین ترتیب که مثلاً قطعات طلای وزن نشده را به‌تدریج در آب انداخته و آب خارج شده را وزن می‌کند تا «وزن این آب، برابر وزن آن آب شد که به صد مثقال زر برون آمده بود».[۴۴] در این مرحله طلا از آب بیرون کشیده شده و خشک می‌شود و توزین می‌گردد. همین عمل برای نقره و فلزات دیگر انجام می‌شود تا «صحت جمله اعمال معلوم گشت». همان‌گونه که مشاهده می‌شود، روش بیرونی کاملاً بر شیوهٔ تجربی و عالمانهٔ امروز مبتنی است. علاوه بر این، بیرونی در آزمایش‌های خود طلا را به‌عنوان مرجع فرض کرده و وزن سایر فلزات را نسبت به آن (به مأخذ ۱۰۰) می‌سنجد.

خازنی به نقل از بیرونی می‌گوید که اگر بخواهیم وزن فلزی را که از نظر حجمی برابر صد مثقال طلا است بدانیم از نسبت متکافی استفاده می‌کنیم. به‌عبارت دیگر، وزن طلا در وزن آب هم‌حجم آن ضرب شده و تقسیم بر وزن آب هم‌حجم فلز مورد نظر می‌شود، حاصل وزن فلز هم‌حجم طلا است.

رابطهٔ بیرونی (خازنی) را به زبان علمی امروز می‌توان چنین نوشت:

$$\frac{W_s}{W_g}=\frac{W_{wg}}{W_{ws}}\Rightarrow W_s=W_g.\frac{W_{wg}}{W_{ws}}=W_g.\frac{V_g}{V_s} \quad (۲۶)$$

به‌عنوان مثال، وزن نقرهٔ هم‌حجم ۱۰۰ مثقال طلا به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

(۲۷)

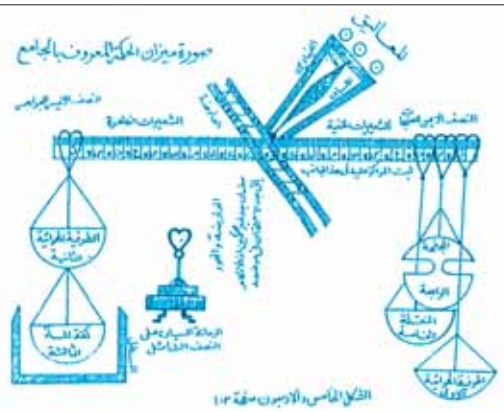
$$W_s=100\times 68/57\times\frac{358/85}{652/13}=3767/64 \text{ حبه} = 54/84 \text{ مثقال}$$

۵. ترازوی حکمت خازنی

همان‌گونه که گفته شد کتاب میزان‌الحکمه مشتمل بر هشت مقاله است که این مقالات به پنجاه باب تفکیک و هر باب به چند فصل تقسیم شده است. سه مقالهٔ آخر کتاب به طراحی، ساخت و به‌کارگیری ترازوی حکمت اختصاص یافته است. عبدالرحمن خازنی در انتهای کتاب میزان‌الحکمه جزئیات «ترازوی حکمت» خود را تشریح می‌کند. «ترازوی حکمت» خازنی همانند دیگر ترازوها دارای یک شاخص و یک میلهٔ افقی بوده ولی به‌جای یک یا دو کفه، چندین کفه داشته است.

۵-۱. شرح ترازو

ترازوی حکمت عملاً یک ترازوی آبی با پنج کفه یا پله است که به نحو هوشمندانه‌ای آویخته شده و دارای زبانه‌ای بسیار حساس است. طول کلی بازوی ترازو ۴ ذراع (حدود ۲ متر) و طول زبانه یک ذراع (نیم متر) است.[۴۵] ضخامت بازوی A شش سانتی‌متر است که در وسط ضخیم‌تر طراحی شده تا مقاومت بیشتری داشته باشد (در نقطهٔ C). تیر عرضی B از C می‌گذرد، متناظر آن دو قطعهٔ عرضی F از چنگال هستند. شکل ۸ ترازوی حکمت خازنی را از متن عربی کتاب نشان می‌دهد.



شکل ۸. ترازوی حکمت خازنی (میزان‌الحکمه)

خازنی می‌گوید هرچه طول تیر بیشتر باشد، ترازو دقیق‌تر است. زبانهٔ مذکور به اندک وزنی، حرکت می‌کند. در یک ظرف ترازو کفه‌ای مانند کفهٔ ترازوهای معمولی آویخته می‌شود و در زیر آن کفهٔ دومی آویخته می‌گردد. این کفهٔ دوم به‌گونه‌ای ساخته می‌شود که همواره در آب باشد.

در انتهای طرف دیگر بازو کفه‌ای آویخته شده که به آن «کفهٔ معیار» گفته می‌شود. دو کفهٔ دیگر یکی برای طلا و دیگری برای نقره ساخته می‌شود و هر سه کفهٔ مذکور در طرف کفهٔ معیار آویخته می‌شوند.

هر دو طرف تیر افقی به‌دقت درجه‌بندی می‌شود و علامت‌ها طوری حک می‌شود که نخ یا حلقهٔ کفه‌ها در آن قرار گیرد. وزن هر پنج کفه برابر است و کفه‌ها به‌گونه‌ای تنظیم شده‌اند که هم بتوان وزن مخصوص را اندازه‌گیری کرد و هم همبسته‌های دو فلزی را تحلیل و یا کشف نمود. کفه‌ای که می‌تواند در آب فرو رود، کفهٔ مخروطی‌شکل یا کفهٔ حکمت خوانده می‌شود؛ چرا که جسم مورد شبهه از آن آویخته می‌شود. کفهٔ چهارم، کفّةالمُجَنَّحه[٤٦] خوانده می‌شود و در دو طرف دارای حفره‌ای است به‌طوری که می‌تواند به کفه‌های دیگر نزدیک شود (شکل ۸). وزنهٔ متحرک (رُمانه سیّاره) برای تنظیم بازو در هنگام ضرورت استفاده می‌شود. در حالات مختلف اندازه‌گیری، بعد از تعادل و توازن ترازو، مقادیر مورد نظر می‌تواند مستقیماً از درجات روی بازو خوانده شود. خازنی نحوهٔ تعلیق ترازو را با جزئیات شرح می‌دهد؛ جدول وی حالات پایدار و ناپایدار دستگاه را برای موقعیت‌های مختلف نشان می‌دهد.

مهم‌ترین مزیت ترازوی حکمت، برای محاسبهٔ همبسته‌های دو یا چند فلزی یا آزمایش خلوص فلزات گران‌قیمت، اندازه‌گیری مستقیم آن است.

دقت ترازوی حکمت: ترازوی حکمت از دقت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. مهم‌ترین عواملی که این دقت و حساسیت را پدید آورده‌اند،عبارت‌اند از:

الف. بازوی طولانی (حداقل ۲ متر)

ب. تعلیق تقریباً بدون اصطکاک ترازو

پ. انطباق مرکز ثقل بازو و قاب زبانه

ت. نزدیکی مرکز ثقل و بازوی نوسان‌کننده

ث. تعلیق دوگانه که منجر به پایداری بیشتر دستگاه می‌شود. نیز به حرکت زبانهٔ (D) فزونی می‌دهد (که به معنای حساسیت بالاتر است)

ج. دقت فراوان در ساخت و ترکیب اجزای ترازو.

خازنی مدعی است که «اگر وزن بارهای این ترازو به جملگی هزار مثقال باشد، تفاوت یک حبه نماید، چون صانع چابک‌دست و لطیف‌صنعت باشد و آن را از سر علوم و معرفت ساخته باشد.»[٤٧]

به‌عبارت دیگر خطای ترازو کمتر از ۱ در ۶۰۰۰۰ (یا حتی ۱ در ۱۰۰/۰۰۰ وابسته به مقدار حبه) خواهد بود اگر آن را با دقت ساخته باشند.

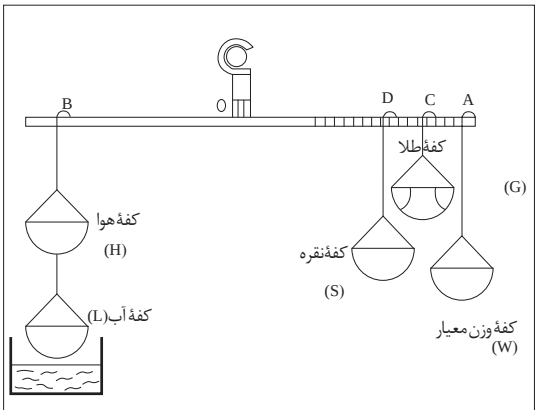
لذا، با این ترازو وزن مخصوص را با دقتی می‌توان اندازه‌گیری کرد که، حداقل هفت قرن بعد، در قرون هجده و نوزدهم میلادی، در اروپا وزن مخصوص را اندازه می‌گرفتند [٤].

در اینجا یکی از روش‌های خازنی تحلیل علمی می‌شود.

۵-۲. روش تشخیص یک همبستهٔ دوفلزی با استفاده از ترازوی حکمت خازنی

در اینجا یکی از روش‌های اندازه‌گیری خازنی که در ترجمهٔ میزان‌الحکمه توضیح داده شده است را شرح می‌دهیم.

نخست ترازوی پنج کفه در موقعیتی قرار می‌گیرد که تعادل برقرار و بازوی AB در وضعیت کاملاً افقی باشد. فرض می‌شود که تعادل ترازو با فرض پر بودن کفهٔ آبی L برقرار باشد. (شکل ۹ را ببینید)



شکل ۹. نمودار ترازوی حکمت برای محاسبات

۱. ده دینار طلای خالص در کفهٔ هوایی H می‌گذاریم و در کفهٔ W نیز وزنهٔ مناسب را برای برقراری تعادل قرار می‌دهیم. وزن طلا را W_g می‌گیریم. بنابراین،

$$W_g = \gamma_g V_g \qquad (۲۸)$$

دو کفهٔ هوایی H و معیار W در دو انتهای بازو هستند. با توجه به پر بودن کفهٔ آب برای برقراری توازن، وزن وزنهٔ معیار برابر است با:

$$W_1 = W_g + W_w \qquad (۲۹)$$

۲. قطعهٔ طلا را از کفهٔ هوایی H برداشته و در کفهٔ آبی L قرار می‌دهیم. در این کفه، به اندازهٔ حجم قطعهٔ طلا آب خارج می‌شود. لذا ترازو به‌سمت کفهٔ W به زیر می‌گراید. در این حالت داریم:

$$W'_1 = W_g + W_w - \gamma_w V_g \qquad (۳۰)$$

که $\gamma_w V_g$ وزن آب هم‌حجم قطعهٔ طلا است. برای حفظ تعادل می‌توان به زیر کفهٔ آب L وزنه‌ای معیار به وزن $W_{wg} = \gamma_w V_g$ آویخت و بدین ترتیب وزن آب هم‌حجم طلا را معین کرد. با معلوم شدن آن، وزن مخصوص طلا محاسبه

ترازوی حکمت از دقت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. مهم‌ترین عواملی که این دقت و حساسیت را پدید آورده‌اند: بازوی طولانی؛ تعلیق تقریباً بدون اصطکاک ترازو؛ انطباق مرکز ثقل بازو و قاب زبانه؛ نزدیکی مرکز ثقل و بازوی نوسان‌کننده و تعلیق دوگانه است

می‌شود:

$$\gamma_g = \frac{W_g}{W_{wg}} \qquad (۳۱)$$

امـا، برای حفظ تعادل از تغییر محـل کفهٔ طلا نیز می‌توان استفاده کرد.

وزن معیار را به کفهٔ G (کفهٔ طلا) می‌گذاریم و آن را آن‌قدر روی بازوی AO می‌لغزانیم تا تعادل برقرار شود. در این حالت، داریم:

$$W_۱.CO = W'_۱.OB \qquad (۳۲)$$

پلهٔ طـلا را در موقعیت تعادل تثبیـت می‌کنیم و روی بازو علامت می‌گذاریم.

۳. اکنون ده دینـار نقرهٔ خالص را در کفهٔ هوایی می‌گذاریم بـه وزن W_s $(W_s = \gamma_s V_s)$ و در کفـهٔ وزنه W وزن $W_۲$ را برای تعادل می‌گذاریم. داریم:

$$W_۲ = W_s + W_w \qquad (۳۳)$$

توجه شـود که اگـر $W_g = W_s$، با توجه بـه $\gamma_g > \gamma_s$، داریم: $\gamma_{gs} > \gamma_g$، در ضمن، اگر $W_g = W_s$، آن‌گاه، $W_۱ = W_۲$.

۴. در این مرحله، قطعهٔ نقره را در کفهٔ آب قرار می‌دهیم. به اندازهٔ حجم قطعهٔ نقره V_s آب از کفهٔ L خارج می‌شـود و بازو به‌سمت A متمایل می‌شود. اکنون، وزن $W_۲$ را در کفهٔ نقرهٔ S قـرار داده و کفه را آن‌قدر روی بازوی AO جابه‌جا می‌کنیم تا تعادل برقرار شود. در این‌حالت

$$W' = W_s + W_w - \gamma_w V_s$$

تعادل لنگرها می‌دهد:

$$W_۲.DO = W'_۲.OB \qquad (۳۴)$$

محـل کفهٔ نقـره در ایـن وضعیت تعـادل روی بازوی AO علامت‌گذاری می‌شود.

بـا توجه به اینکه $\gamma_w V_s > \gamma_w V_g$، لذا، $W'_۲ < W'_۱$. در ضمن $W_۱ = W_۲$، لذا از ترکیب دو رابطهٔ (۳۲) و (۳۴) خواهیم داشت:

$$\frac{W'_۲}{W'_۱} = \frac{OD}{OC} \qquad (۳۵)$$

با توجه به اینکه $W'_۱ > W'_۲$، لذا $OD < OC$ همان‌گونه که انتظار می‌رود.

لازم به ذکر اسـت اگـر وزنهٔ $W_۲$ را در کفـهٔ طلای G قرار می‌دادیم باز هم به‌سمت پایین می‌گرایید.

اکنون موقعیت‌های طلا و نقره روی بازو مشـخص می‌شود. عمل فوق بارها انجام می‌شود تا دقت مورد نظر حاصل شود.

تذکـر: بـا توجـه بـه اینکـه وزن‌هـای ظاهـری طـلا و نقـره $W'_g = W_g - W_{wg}$ و $W'_s = W_s - W_{ws}$، با عنایت به این موضـوع که وزن ثابت آب کفهٔ آبـی W_w را می‌توان با تنظیم مناسـب ترازو، از روابط حذف کرد رابطهٔ (۳۵) را به شکل زیر نیز می‌توان نوشت:

$$\frac{W'_s}{W'_g} = \frac{OD}{OC} \qquad (۳۶)$$

۵. اکنون قطعه‌ای از همبستهٔ دو فلزی متشکل از طلا و نقره را در نظر بگیرید با وزن W_a. لذا

$$W_a = W_g + W_s = \gamma_g V_g + \gamma_s V_s \qquad (۳۷)$$

کـه $Va = Vg + Vs$. قطعه را در کفهٔ هوایی می‌گذاریم و آن را وزن می‌کنیم. یعنی

$$W_۳ = W_a + W_w \qquad (۳۸)$$

سـپس W_a را در کفهٔ آب می‌گذاریم. به اندازهٔ حجم V_a آب از کفهٔ L خارج می‌شود. بنابراین، کفهٔ وزنهٔ W به‌سمت پایین خم می‌شود. بنابراین،

$$W'_۳ = W_a + W_w - \gamma_w V_a \qquad (۳۹)$$

$$W'_a = W_a - \gamma_w V_a \qquad (۴۰) \text{ وزن ظاهری قطعه}$$

۶. همان‌طور که قطعهٔ W_a در کفهٔ آبی L اسـت. وزنهٔ $W_۳$ را در کفهٔ طلا می‌گذاریم اگر تعادل برقرار شد، قطعهٔ طلا خالص است؛ در غیر این‌صورت وزنه را در کفهٔ نقره قرار می‌دهیم اگر تعادل برقرار شـد، قطعهٔ نقره خالص است. اگر ممزوج باشد، کفهٔ طلا به‌سـمت پایین حرکت می‌کند. برای ایجاد تعادل و تعیین نسبت ترکیبات، از بیان خازنی چنین فهمیده می‌شود که

$$W_۳.AO = OB.(W_a + W_w) \qquad (۴۱)$$

$$W_۳.OC = OB.(W_a + W_w - \gamma_w V_a)$$

$$W_۳.OC = OB.(W'_a + W_w) \qquad (۴۲)$$

وزن $W_۳$ بیـن دو کفهٔ طلا و نقره چنان توزیع می‌شـود که تعادل ترازو برقرار شود. نسبت طلا و نقره در همبسته به نسبت وزن‌های توزیع شده است. داریم:

$$W_۳ = W_{۳۱} + W_{۳۲} \qquad (۴۳)$$

پی‌نوشت‌ها

۴۰. «ابوریحان می‌گوید: آلتی سـاختم مخـروط، یعنی زیر فراخ و پهن، سـرتنگ... و آن جانب که بـر بالا بود از او لولهٔ شکافته بود، شکافی باریک با شـکل ناودانی، تا چون آلت را پر از آب بکنند و مقدار معلوم فلزی یـا جوهری به میان آب فرو گذارند، آن‌قـدر که جای آب بگیرد آب بـه بالا برآید و از ناودان بیـرون آید و در پلهٔ ترازو رود.
و آن آب را برکشند، و مناسبت میـان آب‌ها را و هـر فلزی و جوهری بداننـد. و چون وزن آب‌هـا معلـوم گـردد، مقدار مسـاحت حجم هر یکی معلو شود...» (ترجمه میزان‌الحکمه، ص ۴۸ و ۴۹)

41. Abattouy, pp. 220- 221

۴۲. زندگی‌نامـهٔ علمـی دانشـمندان اسـلامی، بخش اول، ص، ۳۱۵.

۴۳. ترجمـهٔ میزان‌الحکمـه، ص ۵۳.

۴۴. ترجمـهٔ میزان‌الحکمـه، ص ۵۲.

۴۵. خازنی در توصیف ترازوی خویش می‌گوید:
«عمـودی راسـت املـس متسـاوی‌الاجزاء، ماهی پشت چون عمـود قبـان، و هرچه درازتر بود بهتر باشد، و معلوم اسـت که زر گراینده‌تر اسـت سوی زیر از سیم. پس بر میان آن عمود زبانه‌ای سازیم چون زبانهٔ تـرازو، چنان‌که با اندک مایـه تفاوت بگـردد. (ترجمهٔ میزان‌الحکمـه، ص ۱۲۲ تـا ۱۳۴)

46. Winged

۴۷. ترجمـهٔ میزان‌الحکمـه، ص ۱۲

۴۸. آلدومیلی، شکل ۲ جدول ۱؛ و نیـز، سیدحسـین نصر، علم و تمدن در اسلام، ترجمهٔ احمد آرام، ص ۱۲۸ و ۱۲۹ و ۱۳۳؛ همچنین، مقدمهٔ ترجمهٔ میزان‌الحکمه، ص که.

۴۹. ایـن نمونـه در سـازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران زیر نظر نگارنده سـاخته شـده اسـت، کـه هم‌اکنون در نمایشـگاه دائمـی که در کتابخانـهٔ ملـی برگزار شـده است، وجود دارد.

$W_{۳۱}$ وزنه در کفهٔ طلا و $W_{۳۲}$ وزنه در کفهٔ نقره است.

$$W_{۳۱}.CO + W_{۳۲}.DO = (W_a + W_w - \gamma_w V_a).OB \quad (٤٤)$$

در رابطـهٔ (٤٤) مقادیـر W_a، W_w، $\gamma_w V_a$، OB، OD و OC معلوم هستند، لذا به کمک رابطهٔ (٤٣) می‌توان وزن‌های مثلاً طلا و نقره، $W_{۳۱}$ و $W_{۳۲}$، را به‌دست آورد.

فرض شـود که W_a وزن برحسـب مثقال (یـا گرم و یا هر نـوع واحد دیگر) جسـم مرکـب از طلا و نقره باشـد. W_g و W_s وزن‌هـای طـلا و نقـرهٔ مندرج در جسـم باشـد (یعنی $W_a = W_g + W_s$).

روش دیگر در تعیین ترکیب همبسـته‌های دوفلزی:

از ترازوی خازنی، با اسـتفاده از روابط سـادهٔ زیر نیز می‌توان عیار همبسته‌های دوفلزی را مشخص کرد. طبق تعریف وزن مخصوص جسم برابر است با:

$$\gamma_a = \frac{\text{وزن در هوا } W_a}{\text{وزن آب هم‌حجم } W_w} \quad (٤٥)$$

که $W_a = W_g + W_s$

اگر γ_g و γ_s به‌ترتیب وزن‌های مخصوص طلا و نقره باشد که با روش فوق‌الذکر به‌دقت اندازه‌گیری شـده اسـت. حجم آب جابه‌جا شده با طلا، $W_g = W - W_s$، برابر با $\frac{W_a - W_s}{\gamma_g}$ است و نقره برابر با W_s/γ_s می‌باشد. بنابراین:

$$\gamma_a = \frac{W_a}{W_w} = \frac{W_a}{\gamma_w . V_a} = \frac{W_a}{V_g + V_s} = \frac{W_a}{\frac{W_a - W_s}{\gamma_g} + \frac{W_s}{\gamma_s}}$$

و یا

$$\Rightarrow W_s = W_a . \frac{\frac{۱}{\gamma_a} - \frac{۱}{\gamma_g}}{\frac{۱}{\gamma_s} - \frac{۱}{\gamma_g}} \quad (٤٦)$$

در رابطهٔ بالا وزن مخصوص آب «واحد» فرض شد. بنابراین، با دانسـتن وزن‌های مخصـوص γ_a، γ_g و γ_s و وزن همبسـتهٔ دوفلزی W_a، وزن نقره و نیز طلا در آن به‌طور دقیق محاسـبه می‌شـود. این معادله برای وزن‌های دو مؤلفه با این فرض که حجم جسم مرکب برابر با مجموع حجم مواد تشکیل‌دهندهٔ آن است، معتبر است. رابطه‌ای که برای تمام مخلوط‌های مکانیکی و برای بسیاری از آلیاژها برقرار است.

رابطـهٔ (٤٦) را خانیکـف در توضیحات خـود از بخش‌های ترجمه‌شـدهٔ مورد نظر ارائه می‌کند بدون آنکه آن را استخراج نمایـد [۳]. همین رابطه، با تغییراتی در نمادها، در مقالهٔ [٤] درج شده است.

این فقـره از کتاب خازنـی دربارهٔ ترازو نشـان می‌دهد که علمای فیزیک و مکانیک مسـلمان در آن زمان شایستگی آن را داشته‌اند که وزن مخصوص و چگالی نسبی اجسام را که از یک یا دو ماده ساخته شده بودند با دقت بسیار اندازه بگیرند.

آلدومیلی، مورخ علم ایتالیایی، وزن مخصوص‌های اندازه‌گیری شـده توسـط بیرونی و خازنی را در جدولی آورده و آن‌ها را با اندازه‌های جدید مقایسـه کرده است.[٤٨] [۸] شکل ۱۰ نمودار سه‌بعدی ترسیم‌شده از ترازوی حکمت خازنی را نشان می‌دهد و شکل ۱۱ نمونهٔ ساخته شده را نشان می‌دهد.[٤٩]

شکل ۱۰. نمودار ترسیم‌شده از میزان‌الحکمه

شکل ۱۲. نمونهٔ ساخته شده از ترازوی حکمت

۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

کتاب میزان‌الحکمه خازنی یکی از برجسته‌ترین کتاب‌های فیزیک در تاریخ تمدن اسـلامی محسـوب می‌شود. خازنی را همراه با بیرونی و ابن‌هیثم باید از بنیان‌گذاران روش تجربی در تحقیقات علمی نام برد. ترازوی حکمت خازنی حداقل تا قرن هجدهم میلادی دقیق‌ترین وزن مخصوص‌ها را به‌دست داد.

در این مقاله نشان داده شد که دانشمندان تمدن اسلامی در سده‌های میانه، با توسعهٔ روش‌های دانشمندان دورهٔ باستانی، روش‌هایی را در اندازه‌گیری اوزان مخصوص و تشخیص میزان مواد در همبسـته‌های فلزی به‌کار گرفتند و ابزارهایی اختراع نمودند که، به‌رغم سادگی آن‌ها در مقایسه با ابزارهای جدید، با آن‌ها پاسخ‌های صحیحی و دقیقی به‌دست می‌آوردند.

هـر چند تمرکز مقالهٔ حاضر بـر ترازوهای آبی بود، اما هنوز مبحـث ترازوها در میزان‌الحکمه، همـراه با موضوعات متنوع دیگـر، محل مطالعـه و تحقیق فراوان دارد. کتاب سرشـار از موضوعات مختلف فیزیکی است که توجه متخصصان ذی‌ربط را می‌طلبـد تـا با زبان جدید مطالب علمـی قدیم بازگویی و بازنویسـی شـود و توصیف علمـی آن‌ها بدان‌گونـه که برای دانشـجویان و معلمان و اسـتادان مفید و قابل استفاده باشد انجام گیرد.

منابع

۱. ابوالفتح عبدالرحمن خازنی، «میزان‌الحکمـه للخازنـی» الطبعـه الاولـی، بمطبعـه دائرةالمعـارف العثمانیـه، الحیدرآباد الدکن، سنه ۱۳۵۹ هـ

۲. ابوالفتح عبدالرحمن خازنی، «ترجمـه میزان‌الحکمـه»، مقدمـه و تصحیح محمدتقی مدرس‌رضوی، انتشارات بنیاد فرهنگ ایران، تهران، ۱۳٤٦

3. Khanikoff, N., "Analysis and Extract of kitab mizan al-hikma, Book of the Balance of Wisdom", Journal of the American oriental Society, No. 6(1859), pp 1-128

4. Hall, R. E., "Al-Khazini, "Dictoinary of Scientific Biography", Princeton University, Vol 7. pp 334-351.

۵. مقاله «ترازو» از: محمدجواد ناطق و فرید قاسملو، دانشنامهٔ جهان اسلام، جلد ٦، صفحات ۸۱۲-۸۱۷، تهران، ۱۳۸۰.

٦. هانـس ای. وولف، «صنایع دستی ایران»، ترجمهٔ سیروس ابراهیم‌زاده، انتشارات و آموزش انقلاب اسلامی، تهران، ۱۳۷۲.

مشخصات کتاب اصلی به قرار زیر است:

Wulf, H. E., "The Traditional Crafts of Persia, Their Development, Tecnology and Influence on Eastern and Western Civilization", The MIT´S Press, Cambridge, 1966.

7. Mohammad Abattouy, "The Islamic Science of Weight and Balances", FSTC Limited, Nov 2006.

۸. آلدومیلی، «علوم اسـلامی و نقـش آن در تحولات علمی جهـان»، ترجمـهٔ محمدرضا شـجاع‌رضوی و اسدالله علوم، مشهد، ۱۳۷۱ ش.